

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР

В 1948 году Д. Бардин и В. Браттейн, работая с точечным *p-n переходом*, обнаружили, что устройство с двумя *p-n переходами* способно создавать усиление электрических колебаний по мощности. Они назвали это устройство транзистором (от английского слова “*transister*” - преобразователь и “*resistor*” - сопротивление). В настоящее время транзистором называют электропреобразовательный прибор с одним или несколькими *p-n переходами* и с тремя или более выводами.

По конструкции транзисторы могут быть как точечными, так и плоскостными, однако, хотя точечные транзисторы были первыми, нестабильность их работы привела к тому, что в настоящее время отечественная промышленность выпускает только плоскостные транзисторы. Плоскостной полупроводниковый триод (транзистор) представляет собой монокристалл полупроводника, в котором две области с проводимостью одного типа разделены областью с проводимостью противоположного типа. Таким образом, могут быть получены *p-n-p* и *n-p-n* транзисторы (см. рис. 1 а, б).

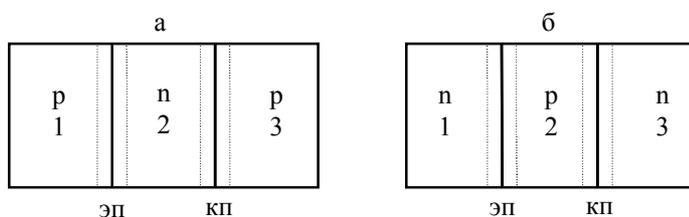


Рис.1. Структура транзистора.

Каждая область имеет название:

область 1 - эмиттер (Э)

область 2 - база (основание, управляющий электрод) (Б)

область 3 - коллектор (К).

Между областями с разным типом проводимости образуется *p-n переход*; образующийся между эмиттером и базой называется эмиттерным переходом (ЭП), *p-n - переход*, образующийся между базой и коллектором, называется коллекторным переходом (КП).

Для соединения с внешней электрической схемой эмиттер, коллектор и база имеют выводы, представляющие собой невыпрямляющие (омические) контакты полупроводника с металлом. Вся система помещается в герметизированный корпус, а выводы электродов через изоляторы выводятся наружу (см. рис. 2).

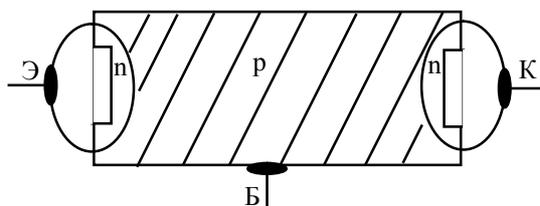


Рис. 2. Устройство транзистора.

На рис. 3 показано условное обозначение транзисторов в схемах.

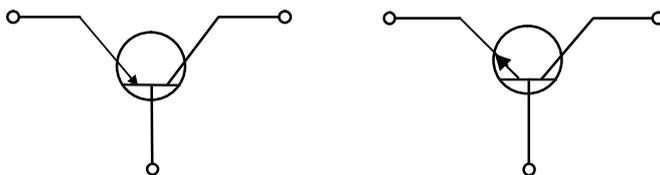


Рис. 3. Условные обозначения транзистора.

Включим между выводами транзистора источники постоянных напряжений E_B и E_K (рис. 4). Полярности этих напряжений таковы, что эмиттерный переход работает в прямом (открыт), а коллекторный переход в обратном направлении. При этом, сопротивление эмиттерного перехода оказывается малым и поэтому для создания требуемого тока эмиттерного перехода достаточно напряжения порядка 0,5-1 В. Сопротивление коллекторного перехода значительно выше и поэтому величина напряжения E_K должна быть порядка нескольких вольт.

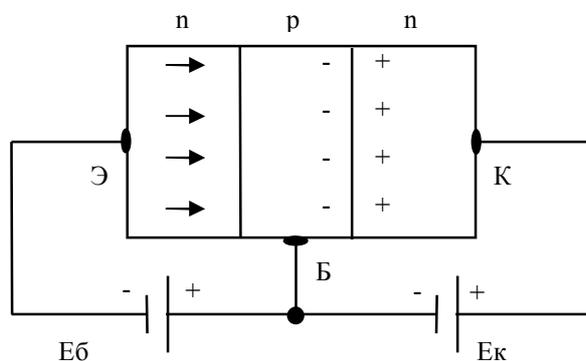


Рис. 4. Принцип работы транзистора.

В транзисторах *n-p-n* типа основными носителями заряда являются электроны. Под действием электрического поля, создаваемого источником E_B , электроны, инжектируемые эмиттером через эмиттерный переход попадают в область базы. Электроны, попавшие в область базы, двигаются там благодаря диффузии к коллекторному переходу (рис. 4). Во время движения через базовую область электроны частично рекомбинируют с дырками и образуют ток базы I_B . Вследствие того, что область базы тонкая (0,01÷ 0,1 мм) большая часть электронов (до 99 %) продвигается к коллекторному переходу. Здесь электроны попадают в поле ускоряющего положительного объемного заряда возникающего при подаче на коллектор положительного напряжения (показан на рисунке знаком +), в результате чего во внешней цепи возникает ток коллектора I_K . Если бы область базы имела значительную толщину, то все электроны, попадающие в базовую область, рекомбинировали бы с дырками, и коллекторный ток отсутствовал.

Следует отметить большое различие между работой электронных ламп (например, триода) и биполярного транзистора. Одним из таких различий является невозможность работы транзистора без тока базы.

Отсутствие тока базы I_B свидетельствует об отсутствии электронов в базовой области, а следовательно и их отсутствие в коллекторном переходе

(то есть $I_K = 0$), в то время, как электровакуумный триод может успешно работать без тока сетки. Для транзистора всегда выполняется следующее соотношение:

$$I_{\Delta} = I_B + I_K$$

Процессы, подобные рассматриваемому, происходят в транзисторах типа *p-n-p*, однако в них меняются ролями дырки и электроны, а также изменяются на обратные полярности напряжения и направления токов.

Необходимо подчеркнуть, что транзистор представляет собой вообще говоря, обратимый прибор, то есть эмиттер и коллектор можно поменять местами, сохранив в той или иной степени работоспособность прибора. Такой вывод вытекает из однотипности крайних слоев. Однако, в связи с несимметричностью реальной структуры (большая площадь коллекторного перехода, различие в концентрации носителей) в большинстве типов транзисторов нормальное и инверсное включение транзисторов неравноценно.

Рассмотренное включение транзисторов, позволяющие строго и наглядно изучать принципы его действия и физические свойства называют включением с общей базой (ОБ). Однако, схема с ОБ является не единственно возможной. Вследствие того, что транзистор имеет три вывода, его можно включать тремя различными способами, так как каждый из выводов (Э.Б.К) может быть использован как общий для входной и выходной цепи.

Поэтому существует три схемы включения (см. рис. 5).

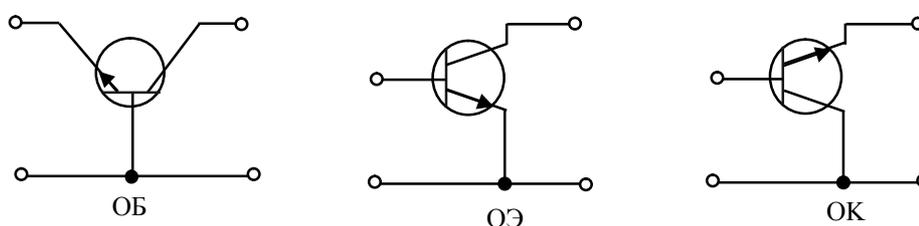


Рис. 5. Схемы включения транзистора.

Так как в транзисторе усиление возможно только при протекании тока в одном направлении (через малое сопротивление эмиттерного перехода и большое - коллекторного), то одним из входных выводов должна быть база, а выходных - коллектор.

Для расчета транзисторных схем необходимо знать зависимости протекающих через транзистор токов от приложенных напряжений.

Наиболее часто используют следующие зависимости:

$$I_{вх} = f(U_{вх}), I_{вых} = f(U_{вых}).$$

Для различных схем включения входные и выходные токи и напряжения оказываются различными.

Входные характеристики $I_{Э} = f(U_{ЭБ})$ для схемы с общей базой показаны на рисунке 6а.

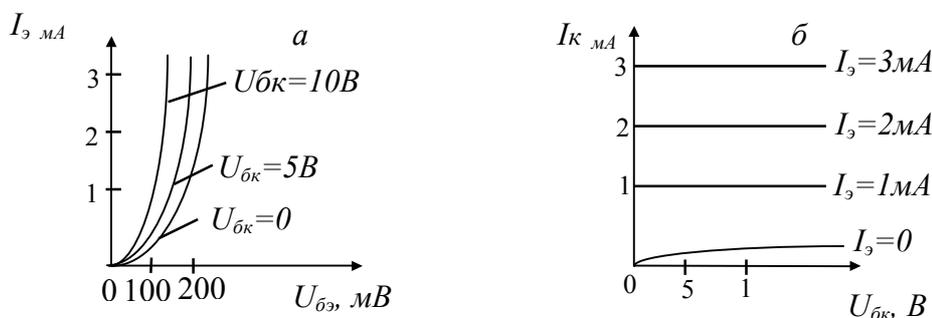


Рис. 6. Семейство входных и выходных характеристик транзистора при включении его по схеме с общей базой.

В большинстве случаев они даются для постоянных значений напряжений $U_{КБ}$. Как видно, входные характеристики аналогичны вольт-амперной характеристике диода для прямого тока,

причем, изменение напряжения $U_{КБ}$ мало влияет на ток эмиттера. Это объясняется тем, что поле, создаваемое напряжением в схеме с общей базой практически все сосредоточено в коллекторном переходе и почти не проникает в область эмиттерного перехода. Но все же с увеличением $U_{КБ}$ наблюдается наибольшее возрастание тока $I_{Э}$. При нормальной рабочей полярности напряжения $U_{КБ}$, когда коллекторный переход работает в обратном направлении, выходные характеристики представляют собой почти прямые линии, идущие с очень небольшим наклоном. Поскольку уже при $U_{КБ} = 0$ ток $I_{К}$ достигает почти максимального значения и при дальнейшем увеличении $U_{КБ}$ почти не возрастает, это означает, что он создан главным образом за счет диффузии носителей, проникающих от эмиттера через базу к коллектору. Поле, создаваемое в коллекторном переходе напряжением $U_{КБ}$ очень мало влияет на ток $I_{К}$. Получается своеобразное насыщение.

Оно объясняется тем, что ток $I_{К}$ как обратный ток создается не основными носителями. Но собственных неосновных носителей в полупроводнике мало, и уже при сравнительно небольших значениях $U_{КБ}$ все они используются. Для увеличения тока коллектора нужно увеличить ток эмиттера. Когда в базу от эмиттерного перехода придут неосновные дополнительные носители (например, электроны, в случае транзистора $n-p-n$). Характеристики наглядно показывают, что с увеличением $I_{Э}$ растет соответственно и ток коллектора. Для больших значений $I_{Э}$ кривые идут выше. Токи $I_{К}$ и $I_{Э}$ почти равны ($I_{К}$ незначительно меньше $I_{Э}$). Напряжение для входных характеристик при нормальных значениях обычно составляет единицы или десятки вольт.

Для случая $I_{Э} = 0$ характеристика выходит из начала координат, затем идет на небольшой высоте почти параллельно оси абсцисс. Она соответствует обычной характеристике обратного тока диода. Ток $I_{к0}$, определяемый такой характеристикой, называют начальным или нулевым током коллектора. Этот ток является неуправляемым и представляет собой один из параметров транзистора.

Из рис. 6б видно, что при перемене полярности $U_{кб}$ ток коллектора резко уменьшается, достигает нуля при напряжениях порядка долей вольта, затем меняет направление и резко возрастает. В данном случае коллекторный переход работает в прямом направлении и достаточно приложить к нему очень небольшое напряжение $U_{кб}$ противодействующее диффузному току, чтобы прекратить этот ток, а затем создать значительный ток в обратном направлении. Участки характеристик, показанные штриховыми линиями, не являются рабочими.

Статические характеристики транзистора при включении его по схеме с общим эмиттером даны на рис. 7.

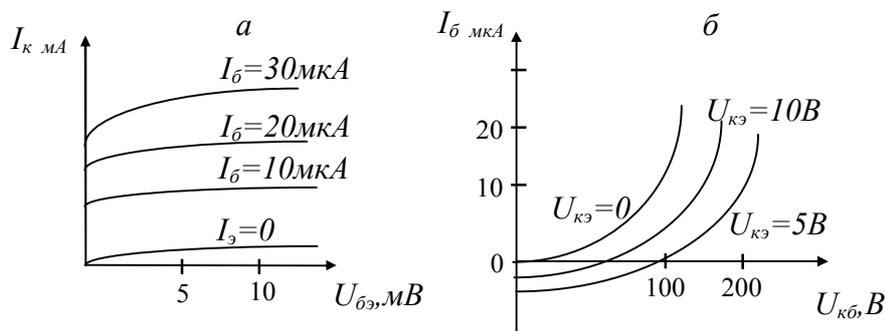


Рис. 7. Семейство входных и выходных характеристик транзистора при включении его по схеме с общим эмиттером.

Выходные характеристики $I_k = f(U_{кэ})$ при различных постоянных значениях тока базы I_b (рис. 7б) прямые. Эти характеристики напоминают анодные характеристики пентода. Однако, у последнего они идут более расходящимися пучками и расстояние между ними при изменении напряжения управляющей сетки на одну и ту же величину меняется. Чем больше отрицательное напряжение сетки, тем ближе друг к другу расположены характеристики пентода. Вследствие этого пентоды при усилении более мощных колебаний создают заметные искажения. У плоскостного транзистора характеристики лучше, чем у пентода. Они идут почти параллельно и на одинаковом расстоянии друг от друга. Поэтому транзисторы могут дать усиление мощных колебаний с меньшими искажениями и более высоким КПД.

Входные характеристики $I_b = f(U_{бэ})$ при различных постоянных напряжениях $U_{кэ}$ показано на рис. 7а. При $U_{кэ} = 0$ эта характеристика подобна обычной вольтамперной характеристике прямого тока эмиттерного перехода, а при увеличении $U_{кэ}$ кривая сдвигается вправо, что соответствует уменьшению тока базы. Кроме того, при $U_{кэ} > 0$ и малых $U_{бэ}$ ток I_b меняет свой знак. Особенности характеристик транзистора для схемы с общим эмиттером объясняется главным образом тем, что часть напряжения приложена к участку ЭБ.

Хотя для расчетов схем с транзисторами достаточно иметь входные и выходные характеристики, иногда используются еще характеристики передачи по току или переходные характеристики в случае схемы с общим эмиттером. Эти характеристики показывают, что с увеличением тока базы растет ток коллектора. У некоторых транзисторов она является почти прямолинейной.

ХОД РАБОТЫ

1. Собрать схему для снятия характеристик биполярного транзистора при включении с ОБ (рис. 8). При этом строго придерживаться указаний преподавателя по использованию источников питания.

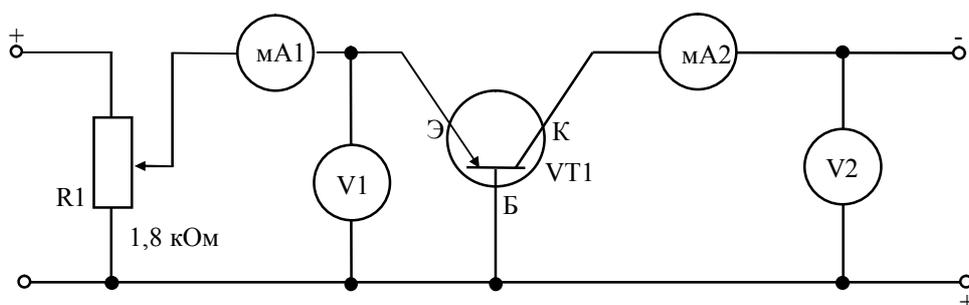


Рис. 8. Схема для снятия характеристик транзистора при включении его по схеме с общей базой.

2. Снять входные характеристики $I_b = f(U_{бэ})$ при трех значениях напряжения $U_{кэ} = 3; 5; 10$ В. Ток I_b менять от 0 до 150 мА. Объяснить ход входных характеристик.
3. Снять семейство выходных характеристик $I_k = f(U_{кэ})$ при нескольких значениях тока эмиттера I_b (значения I_b задаются преподавателем).
4. Определить статический коэффициент усиления по току в схеме ОБ (α).

5. Собрать схему для снятия характеристик биполярного транзистора при включении с ОЭ (рис. 9). При этом строго придерживаться указаний преподавателя по использованию источников питания.

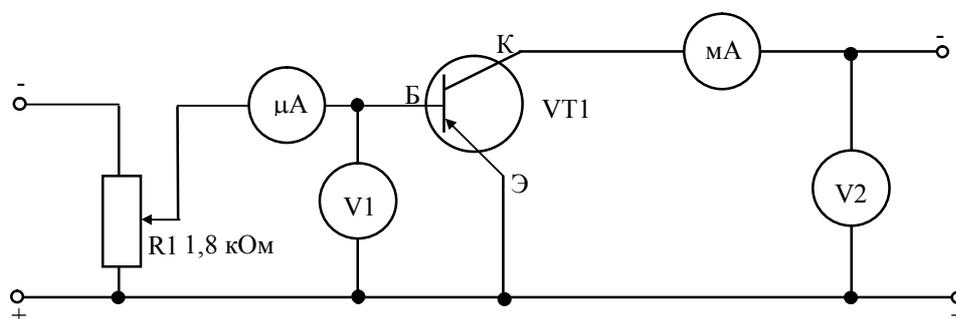


Рис. 9. Схема для снятия характеристик транзистора при включении его по схеме с общим эмиттером.

6. Снять входные характеристики $I_B = f(U_{BЭ})$ при трех значениях напряжений $U_{BЭ} = 3; 5; 10$ В. Ток I_B менять от 0 до 1,5 мА.
7. Снять выходные характеристики $I_K = f(U_{КЭ})$ при нескольких значениях тока базы I_B . (Значения I_B задаются преподавателем).
8. Определить статический коэффициент усиления по току в схеме с ОЭ (β).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1) Почему транзистор не может работать без тока базы?
- 2) Какие схемы включения транзистора существуют?
- 3) Почему входные характеристики транзистора проходят параллельно оси абсцисс?
- 4) Как строится динамическая характеристика на семействе статических характеристик?
- 5) Как рассчитать коэффициент усиления усилительного каскада при использовании биполярного транзистора?